

Особенности расчета эффективного атомного номера сложных сред по ослаблению излучения различных энергий

А.Н. Еритенко, *А.Л. Цветянский, А.А. Полев

Южный федеральный университет, Российская Федерация, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 5

Адрес для переписки: Александр Леонидович Цветянский. E-mail: jecker@inbox.ru

Поступила в редакцию 3 сентября 2016 г., после доработки – 18 апреля 2017 г.

Рассмотрен способ вычисления эффективных атомных номеров $Z_{эф}$ сложных мелкодисперсных сред, состоящих из слоев с различной поверхностной плотностью и сильно отличающимися атомными номерами, по ослаблению излучения различных энергий этими средами. Для учета сильной нелинейной зависимости полного атомного коэффициента ослабления от атомного номера элемента, в отличие от хорошо известного способа, вводится показатель степени n при расчете полного атомного сечения, приходящегося на один электрон атома многоэлементного вещества (электронное сечение). Проверка предложенного способа проведена путем сравнения значений полных атомных коэффициентов ослабления, полученных с использованием эффективного атомного номера и рассчитанных по правилу аддитивности для атомных коэффициентов. Показано существенное улучшение точности определения эффективных атомных номеров сложных веществ. Вычислены эффективные атомные номера двухкомпонентных образцов $Al - X$ ($X = {}^{26}Fe, {}^{29}Cu, {}^{40}Zr, {}^{41}Nb, {}^{42}Mo, {}^{46}Pd, {}^{47}Ag, {}^{48}Cd, {}^{49}In, {}^{50}Sn$) для четырех энергий фотонов 40.32, 59.54, 94.52 и 136.55 кэВ с использованием атомных коэффициентов ослабления взятых из таблиц XCOM. Также величины эффективных атомных номеров получены для образца бинарного состава $Al - Sn$ при различных массовых концентрациях Sn (0.1-0.9) и энергии 59.54 кэВ, а $Al-Sn$ (~0.08) при четырех вышеуказанных энергиях. Показано, что существенное влияние на получаемые значения $Z_{эф}$ оказывает не только разница атомных номеров ($Z_{max} - Z_{min}$) элементов из состава вещества, но и соотношение концентраций этих элементов. Влияние вышеуказанных факторов существенно уменьшается с увеличением энергии фотонов, поскольку снижается вклад фотоэлектрического поглощения в общее ослабление. Знание эффективного атомного номера среды необходимо для оценки качества материалов применительно к их использованию в радиационной защите, медицинской диагностики, разделения горных пород с различным вещественным составом для оперативного контроля массовой доли полезного компонента и др.

Ключевые слова: Рентгеновское излучение, коэффициент ослабления, эффективный атомный номер, бинарные сплавы, сильно отличающиеся атомные номера.

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2017, vol. 21, no. 2, pp. 93-102

DOI: 10.15826/analitika.2017.21.2.005

Features of calculating the effective atomic number of complex media by attenuating radiation of various energies

A.N. Eritenko, *A.L. Tsvetyanskii and A.A. Polev

Southern Federal University, 105, ul. B. Sadovaia, Rostov-na-Donu, 344004, Russian Federation

Corresponding author: Alexander L. Tsvetyanskii, E-mail: jecker@inbox.ru

Submitted 03 September 2016, received in revised form 18 April 2017

The method for calculating the effective atomic number $Z_{эф}$ of complex environments consisting of elements with very different atomic numbers has been proposed. In order to account for the strong nonlinear dependence of the total atomic attenuation coefficient from the atomic number of the element, in contrast to the well-known process, the exponent " n " is introduced in the calculation of the total atomic cross section per electron atom multielement material (electronic section). The verification of the method was carried out by comparing the values $Z_{эф}$ of the total atomic attenuation coefficient obtained with effective atomic num-

ber and calculated by the rule of additivity of atomic ratios. The significant improvement was shown in the accuracy of determining the effective atomic number of complex substances. Effective atomic numbers of the two-component samples Al - X ($X = {}^{26}\text{Fe}, {}^{29}\text{Cu}, {}^{40}\text{Zr}, {}^{41}\text{Nb}, {}^{42}\text{Mo}, {}^{46}\text{Pd}, {}^{47}\text{Ag}, {}^{48}\text{Cd}, {}^{49}\text{In}, {}^{50}\text{Sn}$) for four photon energies 40.32, 59.54, 94.52, and 136.55 keV were calculated using the atomic attenuation coefficient taken from XCOM table. The effective atomic number value were also obtained for the sample of binary composition Al - Sn at various weight concentrations Sn (0.1-0.9) and energy of 59.54 keV, and Al-Sn (~ 0.08) at four of the above energies. It has been shown that a significant impact on the obtained values is provided not only by the difference between the atomic numbers ($Z_{\max} - Z_{\min}$) of elements of the substance's composition, but also by the ratio of the concentrations of these elements. The impact of the above factors was significantly reduced with the increasing photon energy because it reduced the contribution of the photoelectric absorption in the general weakening. The knowledge of the effective atomic number of the medium is necessary to assess the quality of the materials in relation to their use in radiation protection, medical diagnostics, in separation of rocks with different material composition for the operational control of the useful component's mass fraction and others.

Key words: X-ray radiation, attenuation coefficient, effective atomic number, binary alloys, widely differing atomic numbers.

Введение

Важным параметром при выборе материалов для решения задач в области медицинской радиационной диагностики и дозиметрии [1, 2], создании детекторов и биосенсоров ионизирующего излучения [3], радиационной защиты [4], антитеррористической деятельности и ряде других [5] является эффективный атомный номер вещества. Величина эффективного атомного номера, как правило, оценивается экспериментально по массовому или атомному коэффициенту ослабления излучения при прохождении его через образец исследуемого вещества. Однако измерения полных коэффициентов ослабления, проведенные на сплавах или сложных по составу смесях, ограничены из-за многообразия возможных вариантов состава и трудностей в изготовлении многочисленных мишеней в подходящей форме для экспериментов.

Обширные данные по экспериментальным измерениям полных коэффициентов фотонного ослабления в период 1907-1994 гг. сейчас доступны в виде библиографии [6]. Тщательный анализ экспериментальных и теоретических данных указывает на то, что исследования являются весьма полными в отношении простых (одноэлементных) материалов. При взаимодействии фотонов с композиционными материалами, такими как сплавы, смеси и химические соединения, ослабление рентгеновского излучения не может быть представлено одним атомным номером для широкой области изменения состава материала и большого диапазона энергий, в отличие от одноэлементных материалов (за исключением краев поглощения). В этом случае, как уже отмечено, иногда удобно воспользоваться так называемым эффективным атомным номером $Z_{\text{эф}}$ вещества. Под эффективным атомным номером многоэлементной пробы следует понимать значение атомного номера гипотетического одноэлементного образца $Z_{\text{эф}}$, который обеспечивает величину полного коэффициента ослабления, как у многоэлементного образца при одинаковых экспериментальных условиях.

В работах [4, 7, 8] были предложены варианты вычисления эффективного атомного номера, как для полного коэффициента ослабления, так и отдельных процессов: фотопоглощения, образования электронно-позитронных пар. Показано, что для многоэлементных мишеней предпочтительно введение эффективных атомных номеров для каждого процесса с весом, учитывающим его вероятность. Обращено внимание на непостоянство эффективного атомного номера в зависимости от энергии излучения. В дальнейшем, в частности, в работах [9, 10], было проведено сопоставление, предложенных в [2, 7, 8] компактных формул, с обширными экспериментальными данными, как для однородных, так и неоднородных материалов с известной поверхностной плотностью. Более подробный обзор способов вычисления эффективного атомного номера дан в работе [5].

Очевидно, что вклады отдельных процессов взаимодействия рентгеновских фотонов с атомами вещества (поглощение, когерентное и некогерентное рассеяние) в общее ослабление фотонов различны, и их величина определяется, в основном, диапазоном энергий излучения и элементарным составом мишеней. Эффективный атомный номер $Z_{\text{эф}}$ является удобным параметром для представления ослабления рентгеновского и гамма излучения в сложной среде, в геофизических исследованиях, тестировании многокомпонентных гетерогенных материалов, а также для расчета дозы ионизирующего излучения в лучевой терапии [1, 4, 11].

Из результатов работ [9, 12, 13] следует, что используемый способ расчета $Z_{\text{эф}}$ для сред, состоящих из элементов с сильно отличающимися атомными номерами, может приводить к существенным погрешностям. Так, например, в [9] величина эффективного атомного номера смеси из алюминия и олова оказывается существенно ниже 13. Этот случай требует дополнительных исследований, чему и посвящена настоящая работа. Таким образом, задачей нашей работы является надежное определение именно $Z_{\text{эф}}$ с целью дальнейшего использования этого параметра для идентификации, например, некоторых свойств исследуемых матери-

алов, особенно для веществ, состоящих из элементов с сильно отличающимися атомными номерами. Следует отметить, что более точное определение $Z_{эф}$ позволяет выбирать соединения, обладающие специальными свойствами (например, для полупроводниковых солнечных батарей, где эффективный атомный номер полупроводниковых материалов, должен быть более 30 [14]) и т.д., а также правильнее оценивать другую важную характеристику сложного вещества - электронную плотность материалов (число электронов в единице массы многокомпонентного вещества).

Способ вычисления эффективного атомного номера материалов с использованием массовых (атомных) коэффициентов ослабления излучения различной энергии позволяет оценить и степень его неоднородности. Поскольку экспериментально измеряется массовый коэффициент ослабления (поверхностная плотность определяется другими способами), то его значение зависит от конкретного способа получения образца. Так, например, в работе [12] исследуется эффективный номер образцов в процессе приготовления сверхпроводника $YBaCuO$ в диапазоне энергий 59.5-136 кэВ. Измерения были проведены на гомогенных пробах веществ, составляющих смесь Y_2O_3 , CuO и $BaCO_3$, образце самой смеси, а также образце смеси после отжига (прокаливания) и образце после спекания. Сопоставление с теоретическими расчетами для этих составов, не учитывающими фазовые неоднородности и справедливыми для гомогенных материалов, позволяет оценить изменение эффективного атомного номера в зависимости от энергии излучения. Однако необходимо быть уверенным, что для однородных проб использование этого способа не дает больших погрешностей.

Подробное описание схем экспериментальных установок изложено в [9, 12-16]. В этих работах экспериментальное определение коэффициентов ослабления осуществлено посредством измерения ослабления рентгеновского или гамма излучения при прохождении им выбранного набора мишеней. Для этого использован узкоколлимированный пучок излучения с энергией от ~10 кэВ до нескольких МэВ. Регистрация прошедшего излучения производилась полупроводниковым или сцинтилляционным детекторами. В случае протяженных объектов для контроля используют массив (линейка) детекторов, расположенных либо по кругу (для медицинских целей), либо на плоскости (2D) или буквой Г (для досмотровых комплексов). Щелевое коллимирующее устройство формирует узкий веерообразный пучок рентгеновского или гамма излучения. Полупроводниковые детекторы или неорганические сцинтилляторы с фотодиодами, поперечные размеры которых, как правило, порядка нескольких квадратных миллиметров и толщиной в несколько десятков миллиметров в зависимости от энергии излучения, расположены на определен-

ном расстоянии для уменьшения влияния друг на друга за счет рассеянного излучения и т.д. и увеличения геометрической разрешающей способности [17]. Далее эта многоканальная информация от линейек детекторов в виде электрических сигналов обрабатывается с помощью специальных математических программ. Таким образом, рассматриваемая геометрическая схема, используемая для измерения массового коэффициента ослабления – один канал этой системы для регистрации излучения с целью моделирования практических ситуаций и разработки новых алгоритмов расчета.

Цель настоящей работы – оценка влияния сильного отличия атомных номеров элементов, входящих в состав вещества, на значение величины эффективного атомного номера. Для этого исследованы материалы с сильно отличающимися атомными номерами на примере гетерогенных сред, использованных в работе [9], представляющих собой сложенные две пленки различных металлов. Рассмотрены системы $Al - X$ ($Fe, Cu, Zr, Nb, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn$) в диапазоне энергий 59-136 кэВ. Показано, что используемый в зарубежной литературе способ расчета, может приводить к существенным отличиям по сравнению с «классическим» интерполяционным способом по табличным данным.

Теория. Основные формулы для расчета коэффициентов ослабления

Обозначения, используемые в настоящей статье:

ρ – плотность вещества;

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c$ – массовый коэффициент ослабления рентгеновского или гамма излучения многокомпонентным веществом;

N_A – число Авогадро;

$\sigma_{a,i}$ – полный атомный коэффициент ослабления атома элемента i ;

w_i – массовая концентрация элемента i ;

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – массовый коэффициент ослабления излучения элементом i ;

$\sigma_{a,c}$ – полный атомный коэффициент ослабления (соединением) веществом;

f_i – атомная концентрация элемента i в веществе;

n_i – число атомов сорта i в соединении;

A_i – атомная масса элемента i .

Полный массовый коэффициент ослабления электромагнитного излучения определенной энергии однородной многоэлементной средой может быть найден из соотношения [18]

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (1)$$

где массовый коэффициент ослабления i -того элемента связан с атомным коэффициентом (поперечным сечением) соотношением

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = \frac{N_A}{A_i} \sigma_{a,i}(Z_i). \quad (2)$$

Если узкий пучок монохроматических фотонов с начальной интенсивностью I_0 ослабляется средой, состоящей из одноатомных слоев с поверхностными плотностями $(\rho d)_i$, $i = 1, \dots, n$, то интенсивность прошедшего излучения I_c можно записать как

$$I_c = I_0 \exp\left(-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c (\rho d)_c\right),$$

где $(\rho d)_c = \sum_i^n (\rho d)_i$,
а $w_i = (\rho d)_i / (\rho d)_c$,

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \ln\left(\frac{I_0}{I_c}\right) / (\rho d)_c, \quad \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = \ln\left(\frac{I_0}{I_i}\right) / (\rho d)_i$$

Таким образом, такая гетерогенная мишень эквивалентна однородной или мелкодисперсной неоднородной с массовыми концентрациями w_i , $i = 1, \dots, n$ и поверхностной плотностью $(\rho d)_c$. Ослабление в двух и более слоях с различной поверхностной плотностью эквивалентно ослаблению в однородной среде с соответствующими концентрациями элементов и поверхностной плотностью, что отмечено и в работе [9].

Полный массовый коэффициент ослабления многокомпонентной среды при неизменных экспериментальных условиях можно охарактеризовать некоторой функцией, зависящей от двух параметров: $Z_{эф}$ – эффективный атомный номер среды и $A_{эф}$ – эффективный атомный вес среды, что в явном виде может быть записано подобно формуле (2)

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \frac{N_A}{A_{эф}} \sigma_{a,c}(Z_{эф}). \quad (4)$$

Сравнивая формулы (1) и (4), можно получить соотношения для $\sigma_{a,c}(Z_{эф})$ с использованием атомных f_i или массовых w_i концентраций: =

$$\sigma_{a,c}(Z_{эф}) = \sum_i f_i \sigma_{a,i} = \frac{\sum_i (w_i \sigma_{a,i} / A_i)}{\sum_k (w_k / A_k)} = \frac{A_{эф}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c. \quad (5)$$

$A_{эф}$ выводится из соотношения для количества вещества v_c многоэлементной пробы $v_c = \sum_k v_k$:

$$A_{эф} = 1 / \sum_k (w_k / A_k) = \sum_i f_i A_i;$$

$$f_i = \frac{n_i}{\sum_k n_k} = (w_i / A_i) / \sum_k (w_k / A_k);$$

Рассмотрим подробнее широко используемый способ вычисления эффективного атомного номера [19, 20], который применяется и для неоднородных веществ. Полный атомный коэффициент ослабления на один электрон атома сорта i рассчитывается из выражения:

$$\sigma_{e,i} = \frac{\sigma_{a,i}}{Z_i}. \quad (6)$$

При этом полный атомный коэффициент ослабления, приходящийся на один электрон для сложной среды, рассчитывается по одной из следующих формул

$$\sigma_{e,c} = \sum_i f_i \sigma_{e,i} = \sum_i f_i \frac{\sigma_{a,i}}{Z_i} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i. \quad (7)$$

или

$$\sigma_{e,c} = \frac{\sum_i \left(\frac{w_i / A_i}{Z_i}\right) \sigma_{a,i}}{\sum_k \left(\frac{w_k}{A_k}\right)}. \quad (7a)$$

Тогда, учитывая (5), эффективный номер вещества можно оценить следующим образом [19]

$$Z_{эф} = \frac{\sigma_{a,c}}{\sigma_{e,c}} = \frac{\sum_i f_i \sigma_{a,i}}{\sum_i f_i \sigma_{e,i}} = \frac{\sum_i (w_i / A_i) \sigma_{a,i}}{\sum_i \left(\frac{w_i / A_i}{Z_i}\right) \sigma_{a,i}}, \quad (8)$$

или [20]

$$\frac{1}{Z_{эф}} = \sum_i \frac{f_i \sigma_{a,i}}{\left(\sum_k f_k \sigma_{a,k}\right) Z_i} = \sum_i \frac{p_i'}{Z_i} \quad (9)$$

где $p_i' = \frac{f_i \sigma_{a,i}}{\left(\sum_k f_k \sigma_{a,k}\right)}$ – вероятность взаимодействия фотонов с элементом i .

Из формул (7) и (8) следует, на наш взгляд, более наглядная запись

$$\frac{\sigma_{a,c}}{Z_{эф}} = \sum_i f_i \frac{\sigma_{a,i}}{Z_i}. \quad (10)$$

Если использовать массовые коэффициенты ослабления и массовые концентрации, то выражение (10) приобретает следующий вид

$$\frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c}{Z_{эф}} = \sum_i w_i \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{Z_i}, \quad (11)$$

а использование формулы (3) приводит к

$$\frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_c}\right)}{Z_{эф}} = \sum_i \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I_i}\right)}{Z_i}.$$

В этом, частном, случае необходимо лишь знание качественного состава исследуемых составных мишеней из одноэлементных пленок, что аналогично работе [9]. Знать поверхностную плотность мишени нет необходимости.

Значения $Z_{эф}$, рассчитанные по формулам (10) и (11), одинаковы. Формально $Z_{эф}$ в (11) можно рассматривать как эффективный атомный номер сложной пробы, массовый коэффициент ослабления которой $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c$. При этом $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = G(Z_{эф})$, где $G(Z_{эф})$, некоторая функция одного параметра $Z_{эф}$. С другой стороны, $Z_{эф}$ можно найти по зависимости $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = G(Z_i)$, построенной для одноэлементных образцов, используя значения $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ сложной смеси. Учитывая, что атомный вес элемента $A_i \sim Z_i^{1.1}$, $i \cong 6 - 92$, то $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \sim \frac{\sigma_{a,i}}{Z_i^{1.1}}$ и, следовательно, зависимость от Z будет слабее, в отличие от $\sigma_{a,c}$. В ряде случаев, найденное таким образом значение $Z_{эф}$ дает хорошие результаты при вычислении $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c$. Из выражения (4) и выше сказанного следует, что эффективные атомные номера для массового и атомного коэффициентов ослабления должны быть

различны. Так, для образца бинарного состава Al-Sn (7.84 % мас. при энергии 59.54 кэВ эффективный атомный номер, рассчитанный по формулам (10 и 11), равен ~26, а определенный по зависимостям $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = G(Z_i)$ и $\sigma_{a,i} = V(Z_i)$ (рис. 1) для одноэлементных образцов – ~22 и ~19, соответственно. В дальнейшем нас будет интересовать нахождение эффективного атомного номера сложной мишени для полного атомного коэффициента ослабления $\sigma_{a,c}(Z_{эф})$.

Коэффициент атомного ослабления (без учета когерентного рассеяния) в используемой области энергий E можно представить в виде

$$\sigma_a(E, Z) = a(E)Z + b(E)Z^n, \quad (12)$$

где первый член в формуле (12) описывает вклад некогерентного рассеяния, а второй – фотоэлектрического поглощения ($n \sim 4$). Вклад некогерентного рассеяния в полный коэффициент ослабления, как правило, не превышает ~10 % в рассматриваемой области энергии и атомных номеров.

Учитывая сильную нелинейность зависимости полного атомного сечения от атомного номера элемента (12), предлагается находить эффективный атомный номер по модифицированной формуле

$$\frac{1}{Z_{эф}} \equiv \left(\langle 1/Z^n \rangle \right)^{1/n} \cong \left(\sum_i \frac{p_i}{Z_i^n} \right)^{1/n}, \quad (13)$$

где величина n может изменяться от 1 до 4 и зависит от соотношения вкладов рассеяния и фотопоглощения. Заметим, что если использовать определение $Z_{эф}$ согласно формуле (11) для массового коэффициента ослабления, то величина n будет приблизительно на единицу меньше.

Сравним три основных способа определения $Z_{эф}$ материалов по полному атомному коэффициенту ослабления $\sigma_{a,c}$ многоэлементного вещества: 1. «классический» способ – интерполяция по табличным данным ХСОМ полного атомного коэффициента ослабления для простых (одноэлементных) веществ $\sigma_{a,c} = V(Z_i)$, табулированных для данной энергии. На наш взгляд этот способ можно считать основным. Хотя, гораздо удобнее иметь математическую модель, достаточно надежную и проверенную, с помощью которой рассчитывается эффективный атомный номер для заданной энергии первичного излучения; 2. широко используемый способ [9, 12-16, 20], описание которого дано выше (формулы (8-10)); 3. предложенный вариант (13) для материалов, состоящих из элементов с сильно отличающимися атомными номерами. При $n = 1$ формула (13) соответствует второму способу – формула (9).

В первом способе эффективный атомный номер $Z_{эф}$ сложной пробы обеспечивает такое же значение полного атомного коэффициента ослабления $\sigma_{a,c}(Z_{эф})$, как и для многоэлементного образца $\sigma_{a,c} = \sum_i f_i \sigma_{a,c,i}$, при одинаковых экспериментальных условиях.

Результаты проведенных исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость полного атомного коэффициента ослабления σ_a от атомного номера Z для энергии 59.54 кэВ, теоретически рассчитанных по данным ХСОМ [13], в сравнении с экспериментальными данными работ на однокомпонентных мишенях [9, 12-16]. Отмечается хорошее согласие результатов расчетов и данных экспериментов, погрешности которых составляют 3-8 % [8], ~9 % [14], ~10 % [15] и 3-5 % [16]. Для элементов с атомными номерами $40 < Z < 50$ и $22 < Z < 30$ зависимость полного коэффициента ослабления от атомного номера Z может быть аппроксимирована прямой линией. По графику рис. 1 найдены эффективные атомные номера для некоторых сложных соединений и смесей при сильном отличии атомных номеров элементов, входящих в них. Это один из способов нахождения эффективного атомного номера сложной среды, который мы называем «классическим». Предварительные расчеты $Z_{эф}$ по формулам (8)-(10) показали, что вычисленные значения коэффициента ослабления $\sigma_{a,c}(Z_{эф})$ и $\sigma_{a,c} = \sum_i f_i \sigma_{a,c,i}$ существенно отличаются, особенно для составов Al-In, Al-Sn. Однако для двухкомпонентных сплавов Ti-Co [15], $^{40}\text{Zr}-\text{X}$ ($\text{X} = ^{41}\text{Nb}, ^{42}\text{Mo}, ^{46}\text{Pd}, ^{47}\text{Ag}, ^{48}\text{Cd}, ^{50}\text{Sn}$) [9], атомные коэффициенты ослабления которых можно описать приблизительно

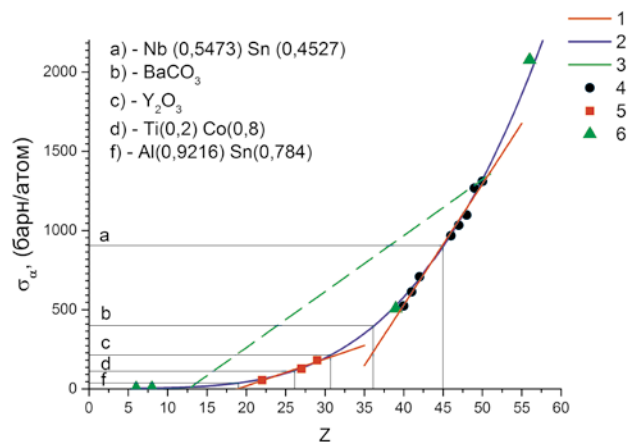


Рис. 1. Зависимость полного атомного коэффициента ослабления излучения энергии 59.54 кэВ от атомного номера Z : 1 – линейная аппроксимация для $22 \leq Z \leq 29$ и $40 \leq Z \leq 50$; 2 – коэффициенты по ХСОМ [13]; 3 – линия соединения для $Z = 13, 50$; 4, 5, 6 – экспериментальные данные соответственно [9, 12, 14-16]; a-f – определение $Z_{эф}$ для различных веществ. Концентрации приведены в массовых долях

Fig. 1. Dependence of the total atomic energy attenuation coefficient of 59.54 keV energy radiation from the atomic number Z : 1 – linear approximation for $22 \leq Z \leq 29$ and $40 \leq Z \leq 50$; 2 – XCOM[13] coefficients; 3 – connection line for $Z = 13, 50$; 4, 5, 6 – experimental data respectively [9, 12, 14-16]; a-f – definition of $Z_{эф}$ for various substances. Concentrations are given in parts by weight

линейной зависимостью от Z (рис. 1), наблюдается хорошее согласие $Z_{\text{эф}}$ рассчитанных по формулам (8)-(10) и «классическим» способом. Отметим хорошее согласие также для органических материалов $Z \leq 14$ [20, 21], где зависимость атомного коэффициента ослабления можно рассматривать практически как линейную зависимость от атомного номера в большом интервале энергий. В этом случае достаточно по двум элементам, входящим в сложную мишень, построить линейную зависимость $\sigma_{a,c}$ ($Z_i = a + b Z_i$ и тогда $Z_{\text{эф}} = \sigma_{a,c} / b - a/b$).

Как видно из графика рис. 1, для системы Al-Sn наблюдается существенная нелинейность зависимости коэффициента ослабления от Z и изменение величины коэффициента ослабления от ~ 13 до ~ 1300 барн / атом. Влияние нелинейности можно существенно уменьшить (рис. 2), если находить не средневзвешенное значение $\langle 1/Z \rangle$ (9), а средневзвешенное значение $\langle 1/Z^n \rangle$ (13), где $1 < n \leq 4$. Конкретное значение n определяется соотношением вкладов фотоэлектрического поглощения и рассеяния в формуле (12).

Критерием правильности предложенного способа определения $Z_{\text{эф}}$ является согласие величин $\sigma_{a,c}(Z_{\text{эф},n})$ (на рисунках и в таблицах для краткости σ_n) и $\sigma_{a,c} = \sum_i f_i \sigma_{a,c}$ (на рисунках, в таблицах – σ_r). Для проверки этого критерия по формуле (13) для $1 \leq n \leq 4$ рассчитаны значения $Z_{\text{эф},n}$. Затем линейным интерполированием («классическим» способом) по табличным данным XCOM [22] находилось значение $\sigma_{a,c}(Z_{\text{эф},n})$. Далее рассчитывались сечения ослабления σ_n по формуле $\sigma_{a,c} = \sum_i f_i \sigma_{a,c}$ и относительная погрешность определения полного атомного коэффициента ослабления $\varepsilon_{\text{отн}} = (\sigma_n - \sigma_r) / \sigma_r$, найденного по значению $Z_{\text{эф},n}$. Для расчетов использовались данные работы [9], в которой мишени для ослабления излучения представляли собой сложенные вместе

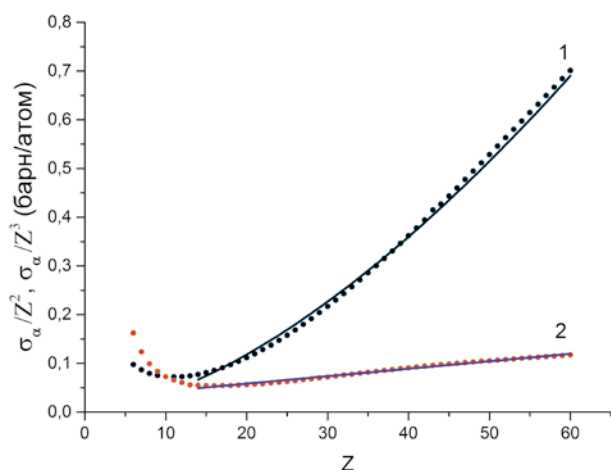


Рис. 2. Зависимость $\sigma_a(Z)/Z^n$ от атомного номера Z : 1 – $n = 2$; 2 – $n = 3$. $E = 59.54$ кэВ. Точки – расчет по XCOM

Fig. 2. Dependence $\sigma_a(Z)/Z^n$ on the atomic number Z : 1 – $n = 2$; 2 – $n = 3$. $E = 59.54$ keV. Points - calculation by XCOM

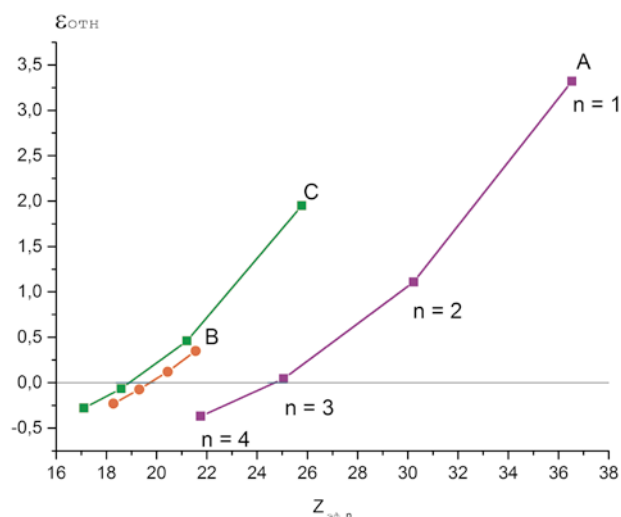


Рис. 3. Зависимость относительной погрешности определения полного атомного коэффициента ослабления $\varepsilon_{\text{отн}}$ (в долях единицы) от эффективного атомного $Z_{\text{эф},n}$ для $E = 59.54$ кэВ: $n = 1, 2, 3$ и 4; А – Al-In (23.71 % мас.); В – Al-Sn (7.84 %); С – Al-Fe (46.87 %)

Fig. 3. Dependence of the relative error of the determination of the total atomic attenuation coefficient ε_{rel} (in fractions of one) on the effective atomic $Z_{\text{эф},n}$ for $E = 59.54$ keV: $n = 1, 2, 3$ and 4; А – Al-In (23.71 % by mass); В – Al-Sn (7.84 %); С – Al-Fe (46.87 %)

две пленки из различных металлов с известными поверхностными плотностями.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимостей относительных погрешностей $\varepsilon_{\text{отн}}$ (в долях единицы) расчета полного атомного коэффициента ослабления от $Z_{\text{эф},n}$ (13) при энергии излучения

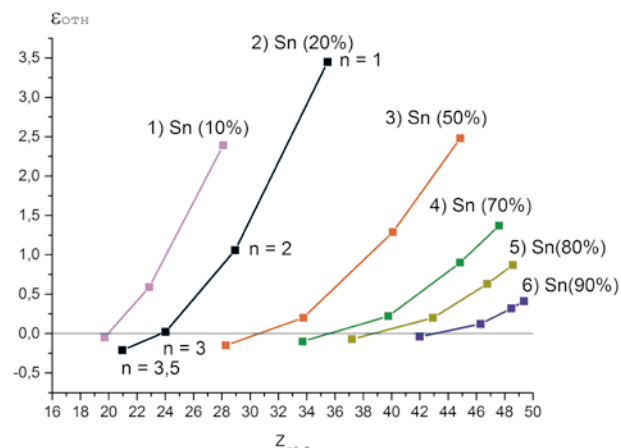


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности определения полного атомного коэффициента ослабления рентгеновского излучения $\varepsilon_{\text{отн}}$ (в долях единицы) от эффективного атомного $Z_{\text{эф},n}$ для $n = 1, 2, 3, 3.5$ в бинарной системе Al – Sn. $E = 59.54$ кэВ

Fig. 4. Dependence of the relative error of the determination of the total atomic attenuation coefficient of X-ray emission ε_{rel} on (in fractions of one) from the effective atomic $Z_{\text{эф},n}$ for $n = 1, 2, 3, 3.5$ in the binary Al-Sn system. $E = 59.54$ keV

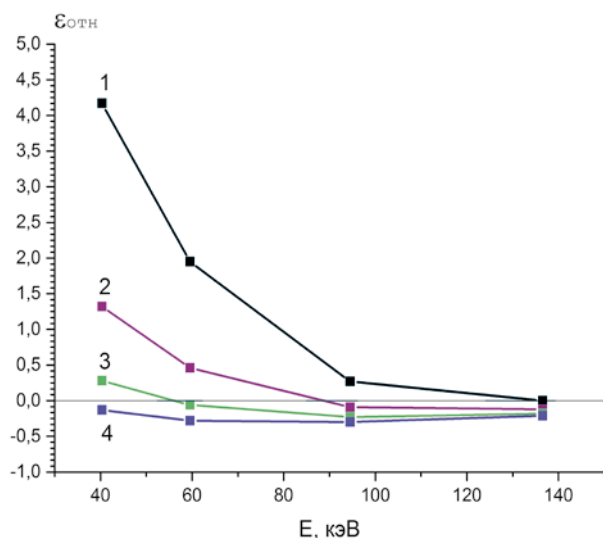


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности определения полного атомного коэффициента ослабления $\varepsilon_{\text{отн}}$ (в долях единицы) от энергии фотонов для $n = 1, 2, 3, 4$ в бинарной системе Al – Sn (7.84 % мас.)

Fig. 5. Dependence of the relative error in determining the total atomic attenuation coefficient of x-ray emission ε_{rel} (in fractions of one) on the photon energy for $n = 1, 2, 3, 4$ in the binary Al-Sn system (7.84 % by mass)

59.54 кэВ и различных значениях n . Заметим, что использование значения $n = 1$ (фактически это широко применяемые формулы (8)-(10)) может приводить к существенным погрешностям $\varepsilon_{\text{отн}}$. Величина погрешности зависит не только от значений атомных номеров (фактически от величин поперечных сечений), но и соотношения концентраций этих элементов. Из графиков рис. 5 следует, что относительная погрешность расчета полного атомного коэффициента ослабления при различных значениях показателя степени n с увеличением энергии фотонов снижается и приближается к

нулю при энергиях более 130 кэВ. Очевидно, это происходит по причине уменьшения коэффициента ослабления при больших энергиях для любых Z за счет уменьшения вклада фотопоглощения, которое ответственно за сильную нелинейность. При $3 < n < 4$ и энергии ~40 кэВ относительная погрешность существенно уменьшается. Таким образом, даже небольшие неточности определения значений эффективного атомного номера могут приводить к значительным погрешностям нахождения полных атомных коэффициентов ослабления ввиду сильной зависимости коэффициента ослабления от атомного номера. Использование широко применяемого способа расчета эффективного атомного номера ((8)-(10), $n = 1$) может приводить к погрешностям, особенно существенным для веществ, состоящих из элементов с сильно отличающимися атомными номерами.

В табл. 1 представлены результаты расчетов эффективного атомного номера $Z_{\text{эф}}$ и полного атомного коэффициента ослабления рентгеновского излучения средой $\sigma_{\text{а.с.}}(Z_{\text{эф},n})$, найденного линейной интерполяцией по данным ХСОМ [21] при различных степенях атомного номера n для составов (массовые концентрации) бинарных образцов из работы [8]. Как следует из табл. 1, существенное улучшение результатов наблюдается при $n = 2.8$. Отметим, что для системы Al-In значение n должно быть, как видно на рис. 3 несколько больше (~3).

Сопоставление с наиболее часто используемыми [6, 7] аналитическими формулами для расчета $Z_{\text{эф}}$ показывает, что для системы Al-X ($X = {}^{26}\text{Fe}, {}^{29}\text{Cu}, {}^{40}\text{Zr}, {}^{41}\text{Nb}, {}^{42}\text{Mo}, {}^{46}\text{Pd}, {}^{47}\text{Ag}, {}^{48}\text{Cd}, {}^{50}\text{Sn}$) наблюдается существенное отличие, особенно для $Z_{\text{эф}}^* = \sum_i f_i Z_i$, поскольку, строго говоря, $Z_{\text{эф}}$ должно хорошо описывать только вклад некогерентного рассеяния. Несмотря на доминирующее массовое процентное содержание Al, вклад суммарного фотопоглощения в полный атомный коэффициент ос-

Таблица 1

Эффективные атомные номера, сечения ослабления σ_r, σ_n (барн/атом), электронные сечения σ_e (барн / (атом · электрон)) для бинарных систем на основе Al и энергии 59.54 кэВ при различных значениях n

Table 1

Effective atomic numbers, σ_r, σ_n (barn / atom) attenuation cross sections, σ_e electron cross-section (barn / (atom · electron)) for binary Al-based systems and 59.54 keV energy for various values of n

Z	$w_Z, \%$	$w_{\text{Al}}, \%$	σ_e	σ_r	σ_n $n = 1$	σ_n $n = 2.8$	$Z_{\text{эф}}$ $n = 1$	$Z_{\text{эф}}$ $n = 2.8$	$Z_{\text{эф}}^*$	$Z_{\text{эф}}^{**}$
26	46.87	53.13	1.99	42.90	57.95	41.23	21.56	19.53	16.88	21.19
29	7.55	92.45	1.14	17.93	21.14	17.19	15.80	14.67	13.54	15.81
40	6.88	93.12	1.26	24.71	42.05	23.71	19.64	16.41	13.58	18.87
41	9.32	90.68	1.39	30.65	62.56	29.74	22.05	17.67	13.81	20.63
42	9.87	90.13	1.43	33.00	72.71	32.22	23.00	18.13	13.87	21.33
46	10.08	89.92	1.53	39.17	108.5	39.32	25.64	19.26	13.91	23.13
47	5.83	94.17	1.30	28.49	61.83	27.70	21.97	17.28	13.52	20.45
48	9.64	90.36	1.54	40.73	122.4	41.28	26.49	19.54	13.87	23.70
49	23.71	76.29	2.61	95.30	411.9	113.0	36.53	25.94	15.45	31.31
50	7.84	92.16	1.45	37.42	110.5	37.48	25.77	19.00	13.70	23.20

Примечание: $Z_{\text{эф}}^* = \sum_i f_i Z_i$ [8]; $Z_{\text{эф}}^{**} = (\sum_i w_i Z_i^{3.1})^{1/3.1}$ [10].

Таблица 2

Эффективные атомные номера, сечения ослабления σ_r , σ_n (барн / атом), электронные сечения σ_e (барн / (атом · электрон)) для бинарных систем на основе Zr при различных значениях n и энергии 59.54 кэВ

Table 2

Effective atomic numbers, σ_r , σ_n (barn / atom) attenuation cross sections, σ_e electron cross-section (barn / (atom · electron)) for binary systems based on Zr and 59.54 keV energy for various values

Z	$w_z, \%$	$w_{Zr}, \%$	σ_e	σ_r	σ_n $n = 1$	σ_n $n = 3$	$Z_{эф}$ $n = 1$	$Z_{эф}$ $n = 3$	$Z_{эф}^*$	$Z_{эф}^{**}$
13	93.12	6.88	1.26	24.7	42.0	22.8	19.64	16.21	13.58	18.87
26	92.28	7.72	4.88	136.7	150.8	139.7	28.02	27.44	26.68	27.70
29	52.53	47.47	9.22	329.0	376.2	342.3	35.67	34.79	33.25	35.13
41	58.20	41.80	15.07	611.6	612.6	612.3	40.59	40.59	40.58	40.59
42	59.72	40.28	15.69	647.1	649.4	648.0	41.23	41.21	41.17	41.22
46	60.27	39.73	18.26	802.4	822.4	810.9	43.93	43.74	43.39	43.82
47	45.58	54.42	17.78	776.3	806.5	789.9	43.66	43.38	42.90	43.49
48	59.09	40.91	19.47	881.3	918.1	892.4	45.26	44.92	44.32	45.08
49	80.80	19.20	22.62	1078.3	1111.6	1089.8	47.67	47.42	46.93	47.54
50	53.53	46.47	20.09	927.5	988.2	946.0	46.18	45.63	44.70	45.92

Примечание: $Z_{эф}^* = \sum_i f_i Z_i$ [8]; $Z_{эф}^{**} = (\sum_i w_i Z_i^{3.1})^{1/3.1}$ [10].

лабления очень существен. Например, для Al–In, Al–Sn он составляет 87 % и 75 % соответственно, а для Al–Cu – ~50 %. Формула $Z_{эф}^* = (\sum_i w_i Z_i^{3.1})^{1/3.1}$ применяется, когда в полном коэффициенте ослабления доминирует фотопоглощение. Но, как видно из табл.1, в полной мере $Z_{эф}^{**}$, как и $Z_{эф}^*$ не согласуется с более точными результатами расчета по формуле (13) при $n = 2.8$.

Из результатов табл. 2 (массовые концентрации элементов образцов на основе ^{40}Zr взяты из [9]) можно сделать вывод, что значения $Z_{эф}$ и коэффициентов ослабления практически не зависят от значения n ($1 \leq n \leq 3$) для $Z \geq 41$, т.е. в этом случае оправдано использование значения $n = 1$. Это связано с тем, что для группы элементов с $40 \leq Z \leq 50$ при энергии излучения 59.54 кэВ зависимость $\sigma_{a,c}$ от атомного номера практически линейная, поэтому и $Z_{эф}^*$, $Z_{эф}^{**}$ дают примерно одинаковые результаты.

Таблица 3

Значение коэффициента n , относительная погрешность определения полного атомного коэффициента ослабления $|\varepsilon_{отн}|$, эффективный атомный номер и вероятность p_{Al} и p_{Sn} взаимодействия излучения с атомами образца Al – Sn (7.84 % мас.е) для различных энергий E

Table 3

The value of the coefficient n , the relative error in determining the total atomic attenuation coefficient $|\varepsilon_{rel}|$, the effective atomic number and the probability p_{Al} and p_{Sn} of the interaction of radiation with Al–Sn atoms (7.84 % by mass) for different energies E

E , кэВ	n	$ \varepsilon_{отн} , \%$	$Z_{эф}$	p_{Al}	p_{Sn}
40.32	3.6	0.5	18.85	0.256	0.744
59.54	2.8	0.1	19.00	0.330	0.670
94.52	1.65	0.04	18.29	0.516	0.484
136.55	1.0	0.01	16.88	0.689	0.311

В табл. 3 приведены оптимальные значения показателя n при различных энергиях ослабляемого излучения. Видно, что при увеличении энергии рентгеновского излучения показатель n стремится к 1, что объясняется сильным уменьшением фотопоглощения. Как следует из последних столбцов таблицы, с увеличением энергии, соотношения вероятностей взаимодействия фотонов с атомами Al и Sn становятся «правильными», т.е. пропорциональными концентрациям элементов, составляющим образец. Таким образом, использование (8)-(10), на наш взгляд, оправдано для веществ, состоящих из элементов с относительно близкими атомными номерами. Для веществ, в состав которых входят элементы с сильно отличающимися атомными номерами, и энергий рентгеновского излучения $E \leq 100$ кэВ необходимо оценивать соотношение вкладов элементов вещества в рассеяние и фотоэлектрическое поглощение в полном атомном коэффициенте ослабления, которые зависят и от атомных номеров и величин концентраций элементов.

Основные выводы и заключение

Проверку правильности определения эффективного атомного номера $Z_{эф}$ гомогенных сред способом [19] следует проводить сравнением полных атомных коэффициентов ослабления $\sigma_{a,c}(Z_{эф})$ и $\sigma_{a,c} = \sum_i f_i \sigma_a(Z_i)$. Согласие в значениях $Z_{эф}$, рассчитанных по теоретическим или экспериментально найденным полным атомным коэффициентам ослабления, не гарантируют правильности определения $Z_{эф}$. В случае сильно отличающихся атомных номеров элементов, входящих в состав материала, это проявляется и при одинаковом способе расчета (для $n = 1$). Существенное влияние на получаемые значения $Z_{эф}$ оказывает не только разница атомных номеров ($Z_{max} - Z_{min}$) элементов из состава

ва вещества, но и соотношение концентраций этих элементов. Показано, что влияние вышеуказанных факторов существенно уменьшается с увеличением энергии фотонов, поскольку снижается вклад фотоэлектрического поглощения в общее ослабление и вклады рассеяния и поглощения становятся сопоставимы. Нахождение $Z_{эф} = \langle 1/Z^n \rangle$ при $1 < n < 4$ значительно улучшает результаты определений эффективного атомного номера для энергии $40 \leq E \leq 140$ кэВ. В большинстве случаев предпочтительней использовать $n \sim 3$. Как следует из результатов табл. 2, использование $1 \leq n \leq 3$ не приводит к существенному изменению значений эффективного атомного номера вещества в случае относительно близких по Z элементов, по крайней мере, для данных составов на основе Zr.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dual-energy radiography of bone tissues using ZnSe-based scintielectronic detectors / B. Grinyov [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Ser. A*. 2007. V. 571. P. 399-403.
2. Shivaramu V. Ramprasath. Effective atomic numbers for photon energy absorption and energy dependence of some thermoluminescent dosimetric compounds // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2000. V. 168, № 3. P. 294-304.
3. Ahmadi M., Lunscher N., Yeow J.T.W. Effective atomic numbers and electron densities of bacteriorhodopsin and its comprising amino acids in the energy range 1 keV-100 GeV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Ser. B*. 2013. V. 300. P. 30-34.
4. Bootjomchai C, Laopaiboon R. Thermoluminescence dosimetric properties and effective atomic numbers of window glass // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. B*. 2014. V. 323. P. 42-48.
5. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography / A. Bonnin [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2014. V. 318. P. 223-231.
6. Hubbel J.H. Bibliography of photon total cross section measurements. National Institute of Standards and Technology (IR) Report No. 5437. 1994.
7. Murty R.C. Effective atomic number of heterogeneous materials // *Nature*. 1965. V. 207. P. 398-399.
8. Hine G.J. The effective atomic numbers of materials for various gamma ray processes // *Rhys. Rev.* 1952. V. 82. P. 385-391.
9. Effective atomic numbers for gamma ray interaction at 59.54 keV in heterogeneous layers of materials using Am^{241} gamma rays / P. Latha [et al.] // *Radiation Physics and Chemistry*. 2012. V. 81. P. 1817-1822.
10. Murty V.R.K. Effective atomic numbers for W/Cu alloy for total photon attenuation // *Radiation Physics and Chemistry*. 2004. V. 71. P. 667-669.
11. Плотников Р.И., Пшеничный Г.А. Флуоресцентный рентгенорадиометрический анализ. М.: Атомиздат, 1973. 264 с.
12. Baltas H., Cevik U. Determination of the effective atomic number and electron densities for YBaCuO superconductor in the range 59.5-136 keV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2008. V. 266. P. 1127-1131.
13. Un A., Sahin Y. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers, mean free

path and kermas for PbO, barite and some boron ore // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2011. V. 269. P. 1506-1511.

14. Effective atomic numbers and electron densities of Cu-GaSe₂ semiconductor in the energy range 6-511 keV / A. Celik [et al.] // *X-Ray Spectrometry*. 2008. V. 37. P. 490-494.
15. Han I., Demir L. Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients in Ti_xCo_{1-x} and Co_xCu_{1-x} alloys // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2009. V. 267. P. 3505-3510.
16. Han I., Demir L. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for Cr, Fe, Ni alloys at different energies // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2009. V. 267. P. 3-8.
17. Курилик А.С. Определение атомного номера вещества объектов по ослаблению пучков фотонов с энергиями до 10 МэВ: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.16. М., 2014. 27 с.
18. Павлинский Г.В. Основы физики рентгеновского излучения. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 240 с.
19. Gamma attenuation coefficients in bismuth borate glasses. / K. Singh [et. al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2002. V. 194. P. 1-6.
20. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV / S.R. Manohara [et. al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2008. V. 266. P. 3906-3912.
21. Gowda Sivalinge, Krishnaveni S., Gowda Ramkarishna. Studies on effective atomic numbers and electron densities in amino acids and sugars in the energy range 30-1333keV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*. 2005. V. 239. P. 361-369.
22. Berger M.J., Hubbell J.H., 1987/99. XCOM: Photon cross sections database, Web Version 1.2, available at <http://physics.nist.gov/xcom>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA. Originally published as NBSIR 87-3597 "XCOM. Photon Cross Sections on Personal Computer".

REFERENCES

1. Grinyov B., Reznikov V., Lecoq P., Naydenov S., Opolonin A., Lisetskaya E., Galkin S., Shumeiko N. Dual-energy radiography of bone tissues using ZnSe-based scintielectronic detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. A*, 2007, vol. 571, pp. 399-403. DOI:10.1016/j.nima.2006.10.119
2. Shivaramu, Ramprasath V. Effective atomic numbers for photon energy absorption and energy dependence of some thermoluminescent dosimetric compounds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2000, vol. 168, pp. 294-304
3. Ahmadi M., Lunscher N., Yeow J.T.W. Effective atomic numbers and electron densities of bacteriorhodopsin and its comprising amino acids in the energy range 1 keV-100 GeV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2013, vol. 300, pp. 30-34. DOI.org/10.1016/j.nimb.2013.01.002
4. Bootjomchai C, Laopaiboon R. Thermoluminescence dosimetric properties and effective atomic numbers of window glass. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*: 2014, vol. 323, pp. 42-48. DOI.org/10.1016/j.nimb.2014.01.018
5. Bonnin A., Duvauchelle Ph., Kaftandjian V., Ponard P. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2014, vol. 318, pp. 223-231. DOI.org/10.1016/j.nimb.2013.09.012

6. Hubbel J.H. *Bibliography of photon total cross section measurements*. National Institute of Standards and Technology (IR) Report No. 5437. 1994.
7. Murty R.C. Effective atomic number of heterogeneous materials. *Nature*, 1965, vol. 207, pp. 398-399.
8. Hine G.J. The effective atomic numbers of materials for various gamma ray processes. *Rhys. Rev.*, 1952, vol. 82, pp. 385-391.
9. Latha P., Vinodkumar A.M., Varier K.M., Babu B.R.S., Joseph Antony, Abdullah K.K., Unnikrishnan M.P. Effective atomic numbers for gamma ray interaction at 59.54 keV in heterogeneous layers of materials using Am^{241} gamma rays. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, vol. 81, pp. 1817-1822. DOI.org/10.1016/j.radphyschem.2012.07.019
10. Murty V.R.K. Effective atomic numbers for W/Cu alloy for total photon attenuation. *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, vol. 71, pp. 667-669. DOI:10.1016/j.radphyschem.2004.04.046
11. Plotnikov R.I., Pshenichnyi G.A. Fluorestsentnyi rentgenoradiometricheskii analiz [X-ray fluorescent radiometric analysis]. Moscow, Atomizdat, 1973. 264 p. (in Russian).
12. Baltas H., Cevik U. Determination of the effective atomic number and electron densities for YBaCuO superconductor in the range 59.5-136 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2008, vol. 266, pp. 1127-1131. DOI:10.1016/j.nimb.2008.02.035
13. Un A., Sahin Y. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers, mean free path and kermas for PbO, barite and some boron ore. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2011, vol. 269, pp.1506-1511. DOI:10.1016/j.nimb.2011.04.011
14. Celik A., Cevik U., Bacaksiz E. and Celik N. Effective atomic numbers and electron densities of CuGaSe_2 semiconductor in the energy range 6-511 keV. *X-Ray Spectrometry*, 2008, vol. 37, pp. 490-494. DOI:10.1002/xrs.1070.
15. Han I., Demir L. Studies on effective atomic numbers, electron densities from mass attenuation coefficients in $\text{Ti}_{1-x}\text{Co}_x$ and $\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x}$ alloys. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2009, vol. 267, pp. 3505-3510. DOI:10.1016/j.nimb.2009.08.022
16. Han I., Demir L. Determination of mass attenuation coefficients, effective atomic and electron numbers for Cr, Fe, Ni alloys at different energies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2009, vol.267, pp. 3-8. DOI:10.1016/j.nimb.2008.10.065
17. Kurilik A.S. *Opredelenie atomnogo nomera veshchestva ob'ektov po oslableniiu puchkov fotonov s energiyami do 10 MeV: Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Determination of the atomic number of the substance of objects by weakening of the photon beams with energies up to 10 MeV. Authors abstract of Ph.D. sci. diss.]. Moscow, 2014. 27 p. (in Russian)
18. Pavlinsky G.V. Fundamentals of X-Ray Physics - Cambridge Science Publishing Ltd, UK, 2008, 244 p.
19. Singh K., Singh H., Sharma V., Nathuram R., Khanna A., Kumar R., Bhatti S.S., Sahota H.S. Gamma attenuation coefficients in bismuth borate glasses. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec B*, 2002, vol. 194, pp. 1-6.
20. Manohara S.R., Hanagodimath S.M., Thind K.S., Gerward L. On the effective atomic number and electron density: A comprehensive set of formulas for all types of materials and energies above 1 keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2008, vol. 266, pp. 3906-3912. DOI:10.1016/j.nimb.2008.06.034
21. Gowda Sivalinge, Krishnaveni S., Gowda Ramkarishna. Studies on effective atomic numbers and electron densities in amino acids and sugars in the energy range 30-1333keV. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Sec. B*, 2005, vol. 239, pp. 361-369. DOI:10.1016/j.nimb.2005.05.048
22. Berger M.J., Hubbell J.H., 1987/99. XCOM: Photon cross sections database, Web Version 1.2, available at <http://physics.nist.gov/xcom>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA. Originally published as NBSIR 87-3597 "XCOM. Photon Cross Sections on Personal Computer".